

УДК 622. 831. 323

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА FLAC3D ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДА МАЛОАМПЛИТУДНОГО НАРУШЕНИЯ

*А.А. Яйцов, Г.А. Дышлевой, Д.А. Затепакин, ЗАО «Донецксталь – Донецкий металлургический завод», Украина*

*В.В. Назимко, Донецкий национальный технический университет, Украина*

Описано результаты применения программного пакета FLAC3D в качестве геомеханической модели перехода малоамплитудного нарушения очистным забоем

**Актуальность проблемы.** Значительная доля угольных месторождений Украины характеризуется достаточно интенсивной геологической нарушенностью, что существенно усложняет их отработку. Наибольшую проблему создают малоамплитудные дизъюнктивы, амплитуда которых превышает вынимаемую мощность пласта. Переход таких нарушений очистными забоями сопровождается уменьшением темпов подвигания лавы в несколько раз, обрушениями непосредственной кровли в рабочее пространство забоя, повышенным износом очистного оборудования, травматизмом и снижением безопасности горных работ. Одной из основных задач при совершенствовании технологий перехода таких нарушений является прогноз и анализ динамики напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающих пород в зоне перехода нарушения. На сегодня существующие геомеханические модели недостаточно адекватно позволяют отразить динамику НДС с учетом нарушенности вмещающих пород и анизотропии их прочностных свойств.

**Существующее состояние проблемы.** Среди современных геомеханических моделей, применяемых для анализа НДС массива горных пород получили популярность методы граничных (МГЭ) [1], конечных [2] элементов (МКЭ), методы физического моделирования на эквивалентных материалах [3] и методы натурных инструментальных наблюдений [4] за состоянием массива горных пород. Применение последнего метода весьма желательно при использовании любых расчетных или физических моделей для настройки их параметров и проверки достоверности результатов моделирования. Использование МГЭ связано с проблемой учета запредельного состояния массива горных пород, а также динамики процесса сдвижения при переходе МАН. Арсенал известных моделей МКЭ не имеет достаточного разнообразия моделей разрушения горных пород с учетом особенностей поведения в запредельном состоянии и анизотропии прочности. Применение физического моделирования наталкивается на трудности учета трехмерного состояния массива, поскольку большинство технологий перехода МАН предусматривает разворот лавы к линии нарушения под определенным углом [5]. Таким образом **целью данной работы** является совершенствование геомеханической модели массива в области перехода малоамплитудного нарушения (МАН).

**Изложение основного материала. Обоснование выбора платформы** для построения геомеханической модели массива горных пород в области перехода МАН. С учетом анализа достоинств и недостатков существующих моделей было принято решение о применении платформы FLAC3D. Использование этого программного пакета связано с преимуществами, которыми он обладает по сравнению с известными на сегодняшний день геомеханическими моделями. Во-первых основной алгоритм модели построен на основе второго закона Ньютона. Это значит, что все расчеты НДС осуществляются в динамике, что весьма важно для анализа процесса перехода МАН. Из практики хорошо известно, что повышение скорости подвигания очистного забоя существенно увеличивает устойчивость непосредственной кровли отрабатываемого пласта, что особенно важно при переходе нарушенного участка. Для решения нашей задачи динамический режим весьма важен, поскольку он позволяет в явном виде учесть скорость подвигания лавы, которая как уже

указывалось, существенно влияет на устойчивость вмещающих пород в зоне нарушения. При малой скорости подвигания лавы итерационный расчет каждого цикла ведется до тех пор, пока не будет достигнуто статическое равновесие вмещающих пород. При высоких скоростях подвигания лавы вмещающие породы все время находятся в неравновесном состоянии, что легко учесть сокращением числа итераций расчета цикла подвигания очистного забоя.

Во-вторых пакет имеет 12 моделей прочности массива горных пород и грунтов. Благодаря правильному подбору модели прочности и ее параметров можно существенно повысить достоверность конечных результатов моделирования.

В-третьих программа построена таким образом, что можно сохранять результаты предыдущего решения и состояние всех переменных модели на предыдущем решении, после чего продолжать решение новой задачи. При исследовании технологии перехода нарушения лавой это преимущество имеет первостепенное значение. Дело в том, что для соблюдения начального состояния системы вначале надо решить задачу об исходном напряженном состоянии массива горных пород и только после этого начать моделирование отработки пласта в зоне МАН. При этом желательно переход решать в несколько циклов подвигания лавы, чтобы реально оценить динамику сдвижений вмещающих пород.

В-четвертых пакет имеет встроенный язык программирования, позволяющий писать собственные программы, которые используют модули пакета FLAC3D, что дает возможность создавать мощные программные продукты, возможности которых ограничены только возможностями программиста, а также запросами технолога и геомеханика.

В-пятых для решения указанной задачи выбрана трехмерная модель, что позволяет учесть непараллельность линии очистного забоя относительно плоскости сместителя переходимого нарушения.

Большим преимуществом пакета перед процедурой метода конечных элементов является то, что узлы соседних зон, на которые разбивается расчетная область, могут не совпадать. Это существенно облегчает построение сложных расчетных схем.

**Пример построения геомеханической модели для анализа перехода МАН.** Построение расчетной схемы перехода МАН приводится на примере ш/у «Покровское».

Особенностью поля шахты является интенсивная нарушенность угольного пласта и вмещающих пород малоамплитудными нарушениями, которые сопутствуют крупным дизъюнктивным нарушениям типа Котлинского надвига. В среднем на один гектар приходится от 4 до 12 малоамплитудных нарушений, в результате чего в процессе отработки выемочного столба лава переходит через десятки нарушений. Переход нарушения очистным забоем связан с замедлением темпов его подвигания, увеличением интенсивности износа забойного оборудования, повышением зольности добываемой горной массы, а также ухудшением безопасности очистных работ. Указанные технологические недостатки влекут за собой серьезные экономические и социальные убытки для предприятия. В связи с этим совершенствование технологий перехода малоамплитудных нарушений очистным забоем является весьма актуальной задачей.

На рис. 1 показан фрагмент плана горных выработок, на котором изображена ситуация при переходе 5 южной лавой блока 2 МАН, амплитуда которого превышала вынимаемую мощность пласта.

На рис. 2 показана трехмерная модель, которая отражает нарушение третьей (наиболее сложной с точки зрения перехода) группы с амплитудой 2м при мощности пласта 1,8м. Параметры нарушения взяты как типичные по данным статистического анализа нарушений в пределах поля ш/у «Покровское» (см. рис.1). На боковых стенках модели запрещались сдвигения по нормали к стенкам, нижняя грань расчетной области была закреплена полностью. На верхней границе области заданы смещения с таким расчетом, чтобы создать вертикальную компоненту напряжения, отвечающую глубине отработки, которая составляла в данном случае около 700м.

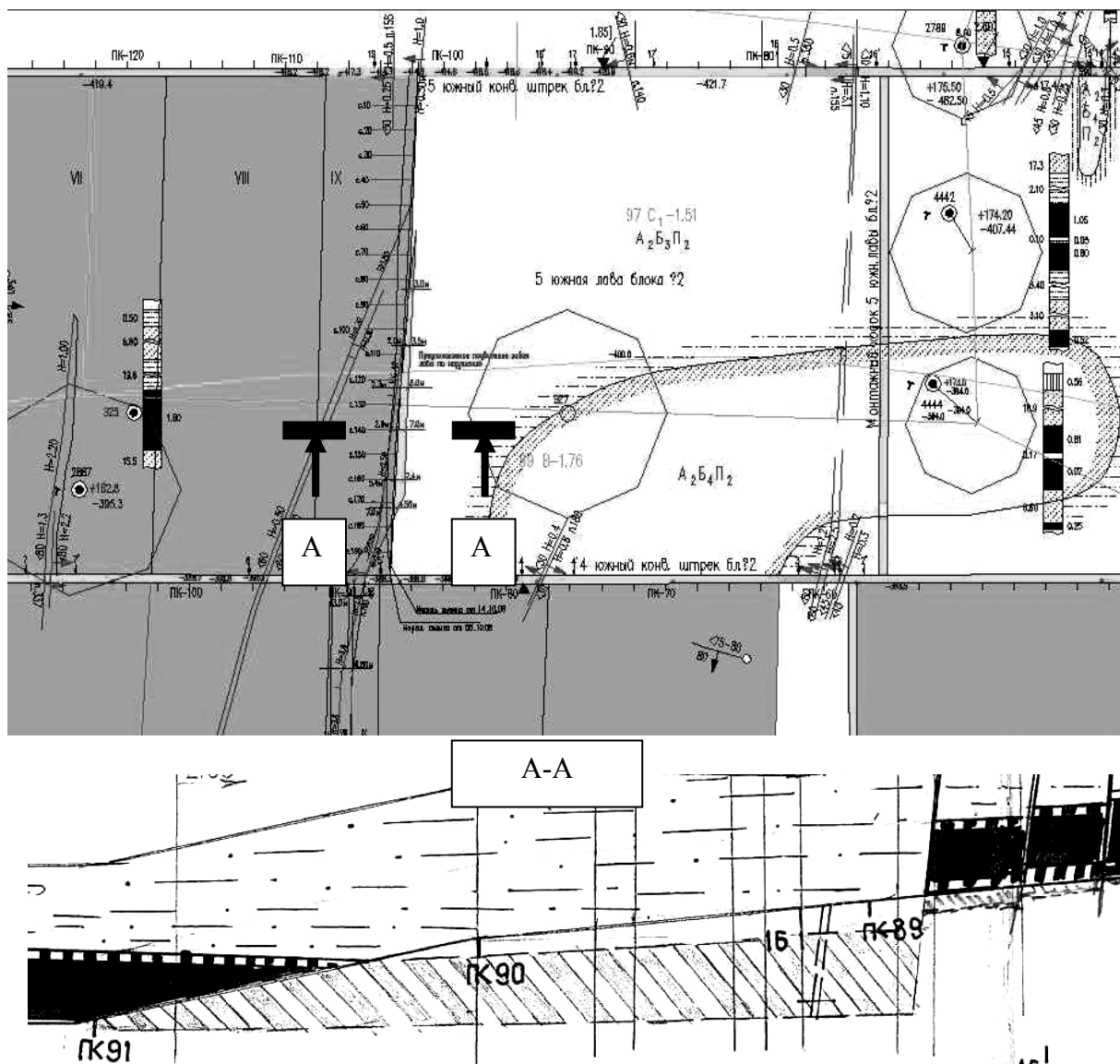


Рис.1. Фрагмент плана горных выработок и разрез нарушения

В процессе построения цифровой модели задавались исходные данные, соответствующие горно-геологическим условиям блока 2. Прежде чем выбрать окончательные параметры модели, были проведены предварительные расчеты, в которых

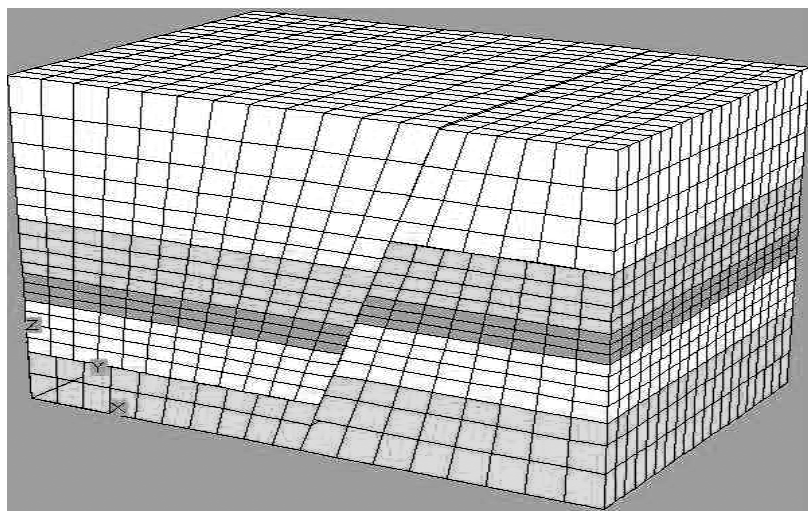


Рис. 2. Расчетная область

оценивались основные проявления горного давления (опускания непосредственной кровли, характер разрушения пород вокруг нарушения и вокруг движущейся лавы, характер распределения горного давления). Вначале была испробована модель прочности Кулона-Мора, которая наиболее приемлема для описания разрушения горных пород. Оказалось, что

ряд важных параметров сдвижения толщи вокруг нарушения моделировалось недостаточно точно. Путем последовательного отбора было испытано три модели прочности пород и подобраны параметры модели, которые адекватно отражали поведение массива в реальных натуральных условиях.

Окончательно было принято решение использовать модифицированную модель Кулона-Мора, которая учитывала влияние ослабления пород вдоль плоскости напластования. С учетом этого деформационные и прочностные параметры вмещающих пород приведены в таблице 1.

Таблица 1.

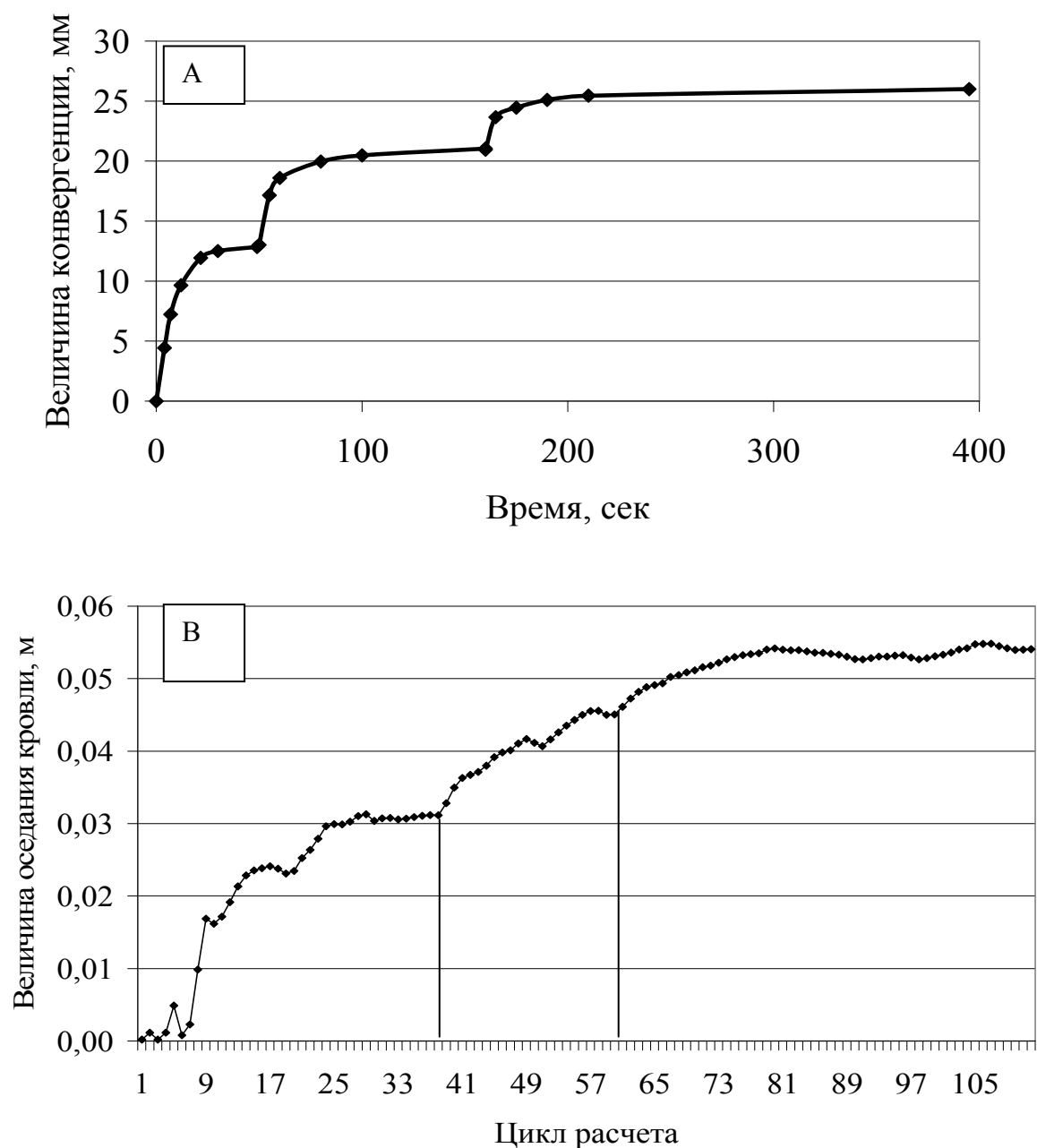
Деформационные и прочностные характеристики вмещающих пород

Название породы	Модуль объемного сжатия, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Угол внутреннего трения матрицы, град	Сцепление в матрице, МПа	Прочность на растяжение матрицы, МПа	Угол дилатансии, град	Сцепление по слоям, МПа	Угол дилатансии вдоль слоистости, град	Угол внутреннего трения вдоль слоистости, град	Предел прочности на растяжение по нормали к напластовани. МПа	
Песчаник	10	3,6	35	5	8	25	2	25	30	1	
Алевролит	9	3,8	20	4	3	23	1	25	20	0,5	
уголь	7	2,5	38	1	0,5	25	1	25	20	0,1	

Перед тем, как начать моделирование перехода нарушения, были проведены специальные предварительные опыты по отработке угольного пласта за пределами влияния нарушения. Для получения представительного числа данных отрабатывалось не менее 6 циклов подвигания лавы, в течение которых она перемещалась на несколько десятков метров и происходило несколько обрушений непосредственной кровли позади посадочного ряда крепи. Результаты моделирования сравнивались с данными независимых экспериментов, в которых определялись характерные проявления горного давления типа величины оседания породной консоли, конвергенции пород кровли и почвы и т.п.

На рис. 3 приведены сравнения измеренных (А) и расчетных (В) величин оседания пород кровли в одном и том же месте рабочего пространства лавы по мере передвижки соседних секций механизированной крепи. Измерения оседаний производились в 5 бис южной лаве блока 2 с помощью измерительной стойки СУИ-2 с индикаторной головкой. Видно, что разгрузка и последующая передвижка соседней секции механизированной крепи вызвала конвергенцию кровли и почвы величиной 13мм. Передвижка следующей секции вызвала приращение оседаний на 8мм и в сумме оно увеличилось до 21мм. Разгрузка третьей секции увеличила оседание лишь на 5мм. По существу, чем дальше разгружаемая секция, тем меньше ее влияние на величину конвергенции пород кровли и почвы. Это объясняется локальным характером возмущения трехмерного напряженно-деформированного состояния отдельной секции механизированной крепи.

Расчетный график конвергенции подтверждает затухающий характер конвергенции вмещающих пород, что свидетельствует о достоверности результатов моделирования. Поскольку компьютерная модель следит за состоянием каждой зоны, чувствительность метода к разрушению каждой индивидуальной зоны высока, что отразилось на микрофлуктуациях кривой оседаний. Вертикальные линии на графиках отделяют периоды



### 3. Сопоставление конвергенции кровли и почвы (А) при последующей передвижке смежных секций механизированной крепи и расчетного оседания кровли (В)

разгрузки первой, второй и третьей секций. Заметим, что решение подобной задачи возможно только на трехмерной модели, причем пришлось составлять отдельную вычислительную программу, которая имитировала разгрузку и передвижку секций крепи, а также осуществляла выборку данных о смещении отдельных узлов расчетной области. Кроме того разработана отдельная программа для имитации процесса снижения сцепления и мобилизации внутреннего трения после разрушения породы. Без такой процедуры ослабления сцепления в массиве после разрушения породы результаты моделирования достаточно сильно расходятся с наблюдаемыми проявлениями горного давления. Только после разработки такой процедуры удалось существенно приблизить результаты моделирования к действительности.

Выполненная оценка разработанной модели дает основание ее применения для анализа

напряженно-деформированного состояния массива горных пород при переходе малоамплитудного нарушения длинным очистным забоем. Оработка пласта осуществлялась во всех случаях заходками или циклами, чтобы отразить основные особенности сдвижения пород вокруг действующей лавы. Всего применялось 6 циклов подвигания со средней длиной подвигания около 5м. Один цикл подвигания реализовали до границы влияния нарушения, в течение четырех циклов лаву передвигали через лежащее крыло нарушения и один цикл осуществляли в висячем крыле нарушенного пласта. Результаты каждого цикла сохраняли в отдельном файле, который находится в электронном приложении и готов для последующего анализа любой доступной информации. При этом представляется широкий спектр параметров, характеризующих процесс сдвижения массива и силового взаимодействия с крепями: все три компоненты смещений и их скоростей, все компоненты нормальных и касательных напряжений, векторы сил, скоростей и перемещений, перераспределения указанных величин в объеме и любой плоскости, ориентация которой выбирается по требованию пользователя, состояние материала модели и характер разрушения в текущий момент и в прошлом. Отметим, что полный спектр данных, которые могут анализироваться гораздо шире перечисленного благодаря использованной концепции объектно-ориентированного программирования и процедуры регистрации так называемой истории. Компьютеру можно заказать слежение за определенным объектом и его параметрами в процессе решения задачи. Это дает возможность построить график (историю) изменения этого параметра (например смещений) любого объекта (например точки в массиве горных пород).

**Результаты анализа НДС.** На рис. 4 показан небольшой фрагмент результатов расчета напряженно-деформированного состояния массива вокруг действующей лавы на конечной стадии перехода нарушения. Важной особенностью данной задачи является моделирование весьма малой скорости подвигания лавы, которая принималась эквивалентной 0,1-0,2 м/сут. Такая скорость подвигания моделировалась путем задания большого количества циклов итераций при решении уравнения второго закона Ньютона. Ориентировочно, принималось 30-40 тысяч циклов расчета на каждый технологический цикл подвигания лавы. При этом величина невязки сил не превышала  $10^{-5}$ , что почти соответствовало статическому равновесию массива горных пород.

На верхнем рисунке показано распределение зон разрушения вокруг действующей лавы. Лишь зоны, имеющие синий цвет находятся в допредельном состоянии. Все остальные цвета обозначают разрушение. При этом в зависимости от цвета причины разрушений могут быть различными, например зона в настоящий момент находится в состоянии запредельного сдвига, а ранее испытала запредельное растяжение. При этом большая часть массива испытывает разрушение не только по наиболее слабому контакту, которым является плоскость наложения пород, но и по матрице. Это значит, что порода разрушена по нетронутому телу массива, например под углом к плоскости напластования.

Подчеркнем, на данном этапе процесс выпуска разрушенной породы (вывалов) не моделировался, поскольку в пакете FLAC3D нет такой готовой опции. Однако очевидно, что интенсивно нарушенные породы должны высыпаться в рабочее пространство действующего очистного забоя, что приводит к развитию куполов, представляющих большую опасность. Подтверждением этому являются результаты натурных обследований 5 южной лавы в момент перехода нарушения. На фрагменте (В) рис. 3 изображен эскиз состояния очистного забоя, где отмечен вывал пород высотой до 5м. Такие вывалы регулярно происходили в 5 южной лаве. Это повышает зольность горной массы и приводит к интенсивному износу забойного оборудования.

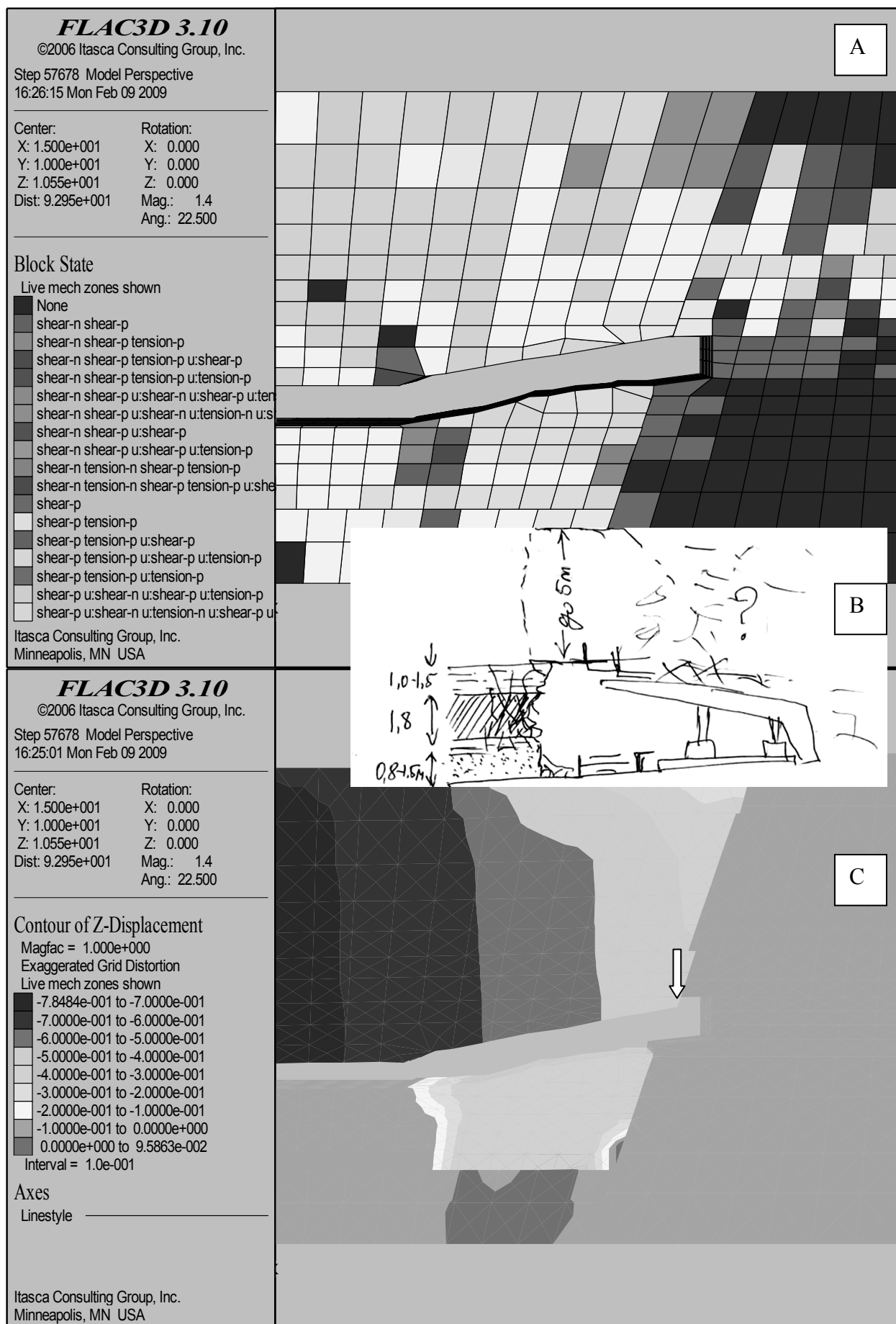


Рис. 4. Характер разрушений (А) и оседаний кровли (С) по данным математического моделирования

Кроме вывалов кровли регулярно регистрируются уступы, которые образуются сразу у забоя лавы. Высота уступов составляет 10-50см. Это свидетельствует о смещении породных блоков в вертикальном направлении путем скольжения по плоскостям субвертикальных трещин горного давления.

Характерно, что такой же уступ получен расчетным путем. Этот уступ изображен полкой стрелкой на нижнем фрагменте рис. 4, причем высота уступа равна 45см, что хорошо согласуется с данными натурных наблюдений. Это свидетельствует о достаточно высокой достоверности результатов моделирования.

**Выводы.** Применение платформы FLAC3D в качестве геомеханической модели перехода малоамплитудного нарушения очистным забоем дает следующие преимущества перед известными моделями: Основной алгоритм модели построен на основе второго закона Ньютона. Это значит, что все расчеты НДС осуществляются в динамике, что весьма важно для анализа процесса перехода МАН. Для решения задачи динамический режим весьма важен, поскольку он позволяет учесть скорость подвигания лавы, которая как известно, существенно влияет на устойчивость вмещающих пород в зоне нарушения. .

FLAC3D имеет 12 моделей прочности массива горных пород и грунтов. Благодаря правильному подбору модели прочности и ее параметров можно существенно повысить достоверность конечных результатов моделирования.

Программа построена таким образом, чтобы было удобно осуществлять учет начального состояния моделируемой системы на любом этапе моделирования. Это позволило адекватно отразить необратимые процессы сдвижений в зоне перехода нарушения с учетом запредельного состояния пород и накопления поврежденности в массиве.

Встроенный в пакет язык программирования позволяет писать собственные программы, которые используют модули пакета FLAC3D, что дает возможность создавать мощные программные продукты, возможности которых ограничены только возможностями программиста, а также запросами технолога и геомеханика.

Для решения указанной задачи выбрана трехмерная модель, что позволяет учесть непараллельность линии очистного забоя относительно плоскости сместителя переходимого нарушения.

Большим преимуществом пакета перед процедурой метода конечных элементов является то, что узлы соседних зон, на которые разбивается расчетная область, могут не совпадать. Это существенно облегчает построение сложных расчетных схем

### Список литературы

1. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера методом конечных элементов/А.С. Ковров// Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2010", том.3. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – С.94-102.
2. Кононенко М.Н. Технология крепления выработок вблизи очистных камер/М.Н. Кононенко// Матеріали міжнародної конференції "Форум гірників – 2010", том.1. – Д.: Національний гірничий університет, 2010-С.216-220.
3. Временные указания по управлению горным давлением в очистных забоях на пластах мощностью до 3,5м и с углом падения до 35<sup>0</sup>.-Л.:ВНИМИ, 1982.-136с.
4. FLAC3D: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions. - Itasca Consulting Group, Inc., 2008.